

# 考虑时变效应的超高层竖向构件差异变形补偿方法

吴杰<sup>1</sup>, 庞存均<sup>1</sup>, 杨永华<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海师范大学 建筑工程学院, 上海 200234)

**摘要:** 针对超高层建筑竖向构件的差异变形问题, 考虑混凝土收缩徐变效应和施工过程的影响, 提出可控制竖向构件差异变形的同步分组补偿方法, 该方法通过设置标高差容许值对框架柱与核心筒构件进行同步分组补偿, 可降低竖向构件自身的标高差和相互之间的相对标高差。同时, 将提出的分组补偿方法应用于天津 117 大厦的标高补偿中, 研究结果表明: 建筑封顶时, 框架柱与核心筒在长期收缩徐变效应下产生的竖向变形超过总变形的 30%, 且随着时间的增加而增加; 通过同步分组补偿法可将竖向构件自身的标高差和相互之间的相对标高差控制在容许值之内, 能有效降低由于时变效应差异而引起的构件附加内力。

**关键词:** 超高层建筑; 标高差; 标高补偿; 收缩; 徐变

中图分类号: TU398

文献标志码: A

## Compensation Method of Differential Deformation for Vertical Members of Super High-rise Buildings Considering Time-dependent Effects

WU Jie<sup>1</sup>, PANG Cunjun<sup>1</sup>, YANG Yonghua<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract:** Aiming to reduce the differential deformations between frame columns and core tubes in super high-rise buildings, a synchronous grouping compensation method is proposed, which considers the time-dependent effects of concrete and the influence of construction process. In this method, frame columns and core tubes are synchronized grouped and compensated by setting the allowable value of the elevation difference. In addition, the proposed grouping compensation method is applied to the elevation compensation of the Tianjin Building 117. The analytical results show that the vertical deformation

of frame columns and core tubes under the effect of long-term shrinkage and creep exceeds 30% of the total deformation, and the proportion increases with time. Besides, the proposed method can limit the elevation difference of the vertical components themselves and their relative elevation difference within the allowable value, which can effectively reduce the additional internal force of the components caused by the time dependent effects.

**Key words:** super high-rise building; elevation deviation; elevation compensation; shrinkage; creep

近年来,随着材料性能的提高和施工技术的进步,超高层建筑在我国进入了高速发展阶段。伴随建筑高度的持续增加,其竖向荷载不断增大,对结构的承载能力提出了新的要求。为此,超高层建筑结构体系从单一的钢筋混凝土体系逐步演化为钢-混凝土组合结构体系<sup>[1]</sup>,其竖向荷载由混凝土柱、钢管混凝土柱、混凝土核心筒等构件共同承担,竖向构件之间由加强组合楼板或伸臂桁架等连接<sup>[2-3]</sup>。在竖向荷载作用下,框架柱和混凝土核心筒将产生不可忽视的竖向变形及竖向差异变形,其中自重、收缩和徐变变形为结构主要的竖向变形,并且这三种变形所占比重随着时间的增加而改变<sup>[4]</sup>。由于竖向变形导致构件标高偏离设计标高,有必要对其标高变化进行预测和修正,以减小对结构的不利影响。

在相同的时间跨度内,由于框架柱和核心筒等竖向构件之间产生差异变形,使连接梁或伸臂桁架出现次应力,引起一系列安全问题,如水平构件倾斜、楼板和墙体开裂、设备损坏等<sup>[5]</sup>。大量的研究表明:型钢混凝土柱、钢管混凝土柱和混凝土核心筒等构件由于截面形式存在差异,导致混凝土内部湿度扩散速率和路径不同,显著影响了构件的竖向变形<sup>[6-8]</sup>。Zhao等<sup>[9]</sup>考虑型钢内混

收稿日期: 2021-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(51878475);上海市期智研究院科技合作项目(SYXF0120020109)

第一作者: 吴杰(1975—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为结构健康监测和土木工程信息技术。

E-mail: wujie@tongji.edu.cn

通信作者: 庞存均(1994—),男,博士生,主要研究方向为组合结构时变性能。E-mail: pangcunjun@tongji.edu.cn



混凝土的多轴应力状态,结合B3模型提出了型钢混凝土柱的时变预测模型,研究表明,多轴应力对混凝土时变变形的影响不可忽视,现有对型钢混凝土柱的时变预测模型亟需改进。Samarakkody等<sup>[10]</sup>研究了钢管混凝土柱的时变特性,发现钢管混凝土柱与核心筒的时变变形差异显著,并建立了一种差异变形计算方法。

在超高层建筑中,为解决构件竖向变形导致的楼层标高偏移和筒柱相对变形不一致等问题,可在施工过程中对建筑所有楼层进行标高补偿。Kim等<sup>[11]</sup>提出了一种分组补偿方法,该方法允许各楼层补偿后的实际标高与设计标高存在一定偏差,既便于施工又能将楼层标高差限制在一定范围内。Cargnino等<sup>[12]</sup>对意大利的政府大楼进行了时变分析,考虑了施工过程的影响,并使用分组补偿法对竖向构件进行了变形补偿,计算结果表明补偿后竖向构件的相对竖向变形显著减小。Secer等<sup>[13]</sup>提出了一种考虑施工过程和混凝土时变特性的构件差异变形补偿方法,称为罚误差补偿法,补偿效果较为理想。Pham等<sup>[14]</sup>改进了平均移动补偿法,加入了可靠度的概念,并用于钢-混凝土结构的差异变形补偿,计算结果表明该方法与平均移动法相比具有更多优势。周绪红等<sup>[15]</sup>对多种补偿方案进行了对比,发现对钢框架-钢筋混凝土核心筒体系使用分组优化补偿法较为合理。

目前,标高补偿方案通常将建筑的楼层看作一个整体,即每层只有一个标高补偿值,忽略了在时间推移下,楼层内多种竖向构件之间的收缩和徐变变形差异,导致补偿效果不佳。为解决此问题,本文基于Park<sup>[16]</sup>提出的优化分组补偿法,同时考虑框架柱与核心筒各自的竖向变形及两者之间的差异变形,提出一种同步分组补偿法,在保证核心筒与框架柱自身标高差位于容许范围内的同时,又能使核心筒与框架柱之间的相对标高差限制在容许值之内,研究成果可为超高层建筑结构的设计和施工提供参考。

## 1 时变模型

### 1.1 收缩徐变模型

收缩徐变是混凝土材料的重要特性之一<sup>[17-19]</sup>。由于超高层建筑的核心筒及框架柱等通常含有混凝土材料,且项目施工周期较长,结构的内部特征(几何、物理、边界等)将随着施工进度的推进而改变,造成结构内部应力重分布,导致结构的收缩与徐变变形呈现非线性增长。而传统的设计理论假定分析对象为恒定结构物,只针对结构使用阶段进行计算分析,忽略施工过程中

结构受力的影响,导致计算结果产生较大偏差。因此,需要建立数值模型对结构施工阶段进行时变分析,以考虑施工过程和材料时变特性对结构性能的影响。

由于混凝土的收缩徐变变形受到环境湿度、混凝土配合比、养护条件、应力历史和构件尺寸等多种因素的影响<sup>[20]</sup>,呈现非线性变化,因此精确预测混凝土的收缩徐变变形非常困难。已有许多学者和机构对此进行了深入研究,提出了多种预测模型,如CEB-FIP(1990)<sup>[21]</sup>、ACI209R<sup>[22]</sup>、GL2000<sup>[23]</sup>和B3<sup>[24]</sup>等模型,但由于实验条件的局限性和侧重性不同,各模型所考虑的影响因素存在相当大的差异。综合以上各模型的预测精度以及目前在我国的应用情况,本文采用CEB-FIP(1990)模型进行收缩和徐变计算。

在CEB-FIP(1990)模型中,收缩应变表达式 $\epsilon_{cs}$ 主要考虑混凝土类型、强度、干燥时间和构件尺寸等影响因素,其表达式为<sup>[21]</sup>

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cs0} \beta_s(t - t_s) \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{cs0}$ 为名义收缩系数,与混凝土强度、水泥种类和环境相对湿度有关; $\beta_s$ 为收缩随时间的发展系数,与构件尺寸、收缩开始时间等因素有关; $t$ 为计算时刻的混凝土龄期; $t_s$ 为收缩开始时对应的混凝土龄期。

CEB-FIP(1990)模型将徐变变形描述成一个整体,不再细分为滞后弹性变形和塑形变形,同时考虑水泥种类、持荷时间、混凝土强度和平均相对湿度等影响因素,采用了一系列系数乘积的形式,其徐变系数 $\phi$ 的表达式为<sup>[21]</sup>

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t - t_0) \quad (2)$$

式中: $\phi_0$ 为名义徐变系数,与构件尺寸、环境相对湿度、混凝土强度和加载时间等因素有关; $\beta_c$ 为加载后徐变随时间的发展系数; $t_0$ 为加载时刻的混凝土龄期。

### 1.2 施工过程时变模型

对于施工中的建筑结构而言,其结构体系和荷载在施工过程中随时间变化缓慢,且具有明显的阶段性。因此,可根据实际或设定的时间节点将施工过程划分为一系列施工阶段,假设每一阶段的结构体系和荷载均不发生变化,对每一施工阶段进行数值模拟。目前针对施工过程的有限元分析方法有两种:生死单元法<sup>[25]</sup>和分步建模法<sup>[26]</sup>。生死单元法首先将所有单元的刚度矩阵乘以一个极小值,然后按照施工过程依次激活单元来实现施工过程的数值模拟。在数值求解中,该方法容易因为构件漂移过大造成求解失败。分步建模法按照施工步骤依次建模,能够较真实、准确地模拟整个施工过程,但每个施工步均需单独建立有限元模型,且每个施工步均以前一个施工步完成后的位移和应力状

态为起始条件,因此每一个施工步的初始条件都需要人工干预。

本文采用分步建模法进行施工阶段数值模拟,该方法需要将前处理、计算分析、后处理分开进行,其基本步骤如下:

(1)按照施工方案将施工过程划分为若干个施工阶段。

(2)建立第*i*个施工阶段有限元模型,形成整体刚度矩阵,施加荷载以及边界条件进行求解,并在后处理模块中将求解得到的内力以及位移计算结果导出。

(3)进行第*i*+1个施工阶段分析。首先按照设计位形导入第*i*个施工阶段有限元模型,然后导入第*i*个施工阶段下位移计算结果并更新几何模型,在该模型的基础上按照上述定位原则进行第*i*+1个施工阶段的新增单元定位,形成第*i*+1个施工阶段有限元模型,组装整体刚度矩阵,再导入第*i*个施工阶段下内力计算结果文件以完成初应力荷载的施加,最后施加外荷载(包括之前施工步已经存在的荷载)以及边界条件后进行求解,求解完成后同样需在后处理模块中导出内力以及位移计算结果。

(4)重复上述步骤,直至所有施工阶段分析结束。

由此可见,分步建模非线性分析是将前处理、求解和后处理分开进行的,所以在施工阶段数较多时工作量较大。当假定材料的本构关系为线性以及位移与应变关系为线性时,可以不考虑材料非线性以及几何非线性的影响,此时施工过程可以采用线性叠加法进行分析。

## 2 分组补偿优化方法

构件的标高补偿可通过预留变形值等方式进行。施工时可将核心筒和框架柱等构件的实际施工标高设置为设计标高加上标高补偿值,从而使构件在某一时间节点达到设计标高,有效缓解和控制超高层结构竖向变形带来的不利影响。由于收缩和徐变具有时效性,不同时刻的补偿值不同,需要定义一个时间节点,称为预定时间节点,经过补偿后,在该时间节点时的构件实际标高等于设计标高。本文针对天津117大厦的预定时间节点为建筑封顶时刻。

### 2.1 不考虑框架柱-核心筒相对标高差的分组补偿法

在进行构件竖向变形补偿时,可使用完全补偿法,该方法不考虑核心筒与框架柱两种构件之间的相对位移差异,仅考虑每种构件自身的竖向位移进行补偿,即每层竖向构件标高补偿值精确等于预定时间节点时构件的标高偏差:

$$\delta_i^b = \Delta_i (1 \leq i \leq N) \quad (3)$$

式中: $\delta_i^b$ 为第*i*层的标高补偿值; $\Delta_i$ 为预定时间节点第*i*层的位移计算值; $N$ 为建筑总楼层数。

使用该方法可使各楼层竖向构件在预定时间节点达到设计标高,但需要对所有楼层单独进行标高补偿,带来较高的经济成本和时间成本。为了提高施工效率,减少成本,实际施工中允许补偿后竖向构件的标高存在一定偏差,可使用分组补偿法<sup>[11]</sup>,该方法将建筑楼层分为若干补偿组,每组通过计算得到统一补偿值,其表达式为

$$\delta_i^b = \delta_t (1 \leq t \leq N_G, N_t \leq i < N_{t+1}) \quad (4)$$

$$|\delta_t - \Delta_i| \leq \delta_{tol} (1 \leq t \leq N_G, N_t \leq i < N_{t+1}) \quad (5)$$

式中: $\delta_{tol}$ 为构件楼层标高偏差容许值,即补偿后在预定时间节点时实际标高与设计标高之差的最大容许值; $\delta_t$ 为第*t*组补偿值;*t*为当前分组的编号; $N_t$ 为第*t*组的起始楼层; $N_G$ 为分组数。 $N_G$ 与 $\delta_{tol}$ 呈负相关关系,当 $N_G$ 等于1时,对应于均匀补偿,即各楼层采用同一标高补偿值,此时楼层标高偏差容许值 $\delta_{tol}$ 最大;当 $N_G$ 等于楼层数时, $\delta_{tol}$ 取最小值0,补偿后所有竖向构件在预定时间节点标高偏差均为0,对应于完全补偿。

图1为分组补偿法流程图,补偿的具体流程如下:首先建立新分组,按照从第一层到顶层的顺序开始检索楼层,将未分组楼层加入当前组。每新加入一层便计算当前分组的补偿值,同时计算每层楼补偿后的标高差是否在标高偏差容许值之内,若在容许值之内则继续加入下一楼层,若超过容许值,则当前分组剔除最新加入的楼层,第一组分组完毕。随后进行下一个分组计算,直到所有楼层分组完毕。

### 2.2 考虑框架柱-核心筒相对标高差的同步分组补偿法

在上一节的分组补偿法中,由于在进行补偿时,分别对框架柱与核心筒进行标高补偿,未考虑框架柱和核心筒之间的相对标高差,使得在进行补偿后,框架柱与核心筒的相对标高差在局部楼层出现较大峰值,影响结构的安全性能和使用性能。为减小此相对标高差,在对核心筒和框架柱单独进行标高补偿的同时,应考虑它们之间的竖向变形差异,减小由于筒柱间竖向变形差异过大引起的不利影响。因此,本文提出一种考虑竖向构件间相对标高差的同步分组补偿法,使得构件在经过标高补偿后,核心筒与框架柱之间的相对标高差在预定时间(如建筑封顶时)也能小于容许标高差 $\delta_{tol}$ 。相对标高差表示如下:

$$|H_{wall}^i - H_{column}^i| \leq \delta_{re} \quad (6)$$

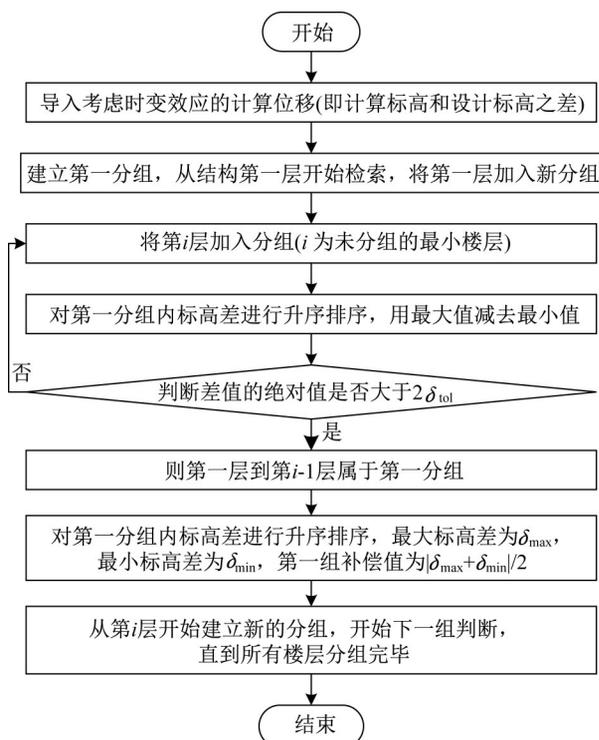


图 1 竖向构件分组补偿流程

Fig. 1 Flow chart of grouping compensation for vertical components

式中:  $H_{wall}^i$  为第  $i$  层核心筒补偿后标高;  $H_{column}^i$  为第  $i$  层框架柱补偿后标高;  $\delta_{re}$  为核心筒与框架柱的相对标高差容许值。

在同步分组补偿法中, 可以分别考虑不同构件自身的标高差以及筒柱之间的相对标高差。经过补偿后, 核心筒与框架柱各自的标高差均小于标高差容许值, 同时筒柱相对标高差也小于相对标高差容许值, 具体流程如图 2 所示。

在同步分组法中, 对核心筒与框架柱进行同步分组, 即框架柱与核心筒每一组的起始楼层和结束楼层完全相同, 可简化后续标高补偿值的优化调整过程。主要流程为: 首先通过同步分组确定框架柱和核心筒构件的补偿值取值范围, 然后建立数学规划模型, 最后求解最佳标高补偿量。设框架柱和核心筒第  $i$  组补偿量分别为  $X_i$  和  $Y_i$ , 筒柱相对标高差可由式(7)表示:

$$[\delta_{i, re}] = ([\Delta_{i, z}] - X_i) - ([\Delta_{i, T}] - Y_i) \quad (1 \leq i \leq N_G) \quad (7)$$

式中:  $\delta_{i, re}$  为第  $i$  组筒柱相对标高差组成的列向量;  $\Delta_{i, z}$  为第  $i$  组框架柱的计算位移组成的列向量;  $\Delta_{i, T}$  为第  $i$  组核心筒的计算位移组成的列向量。

式(7)可变换为

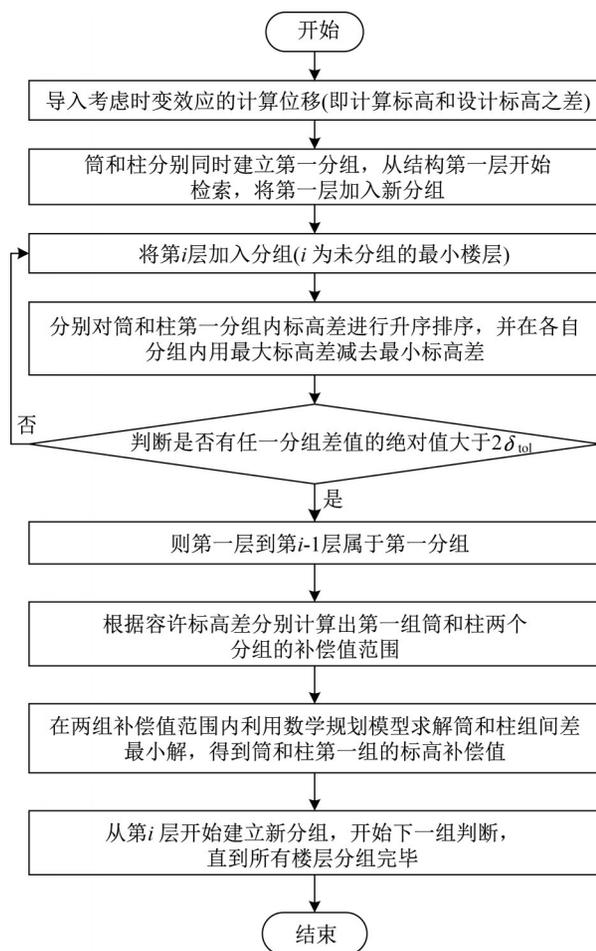


图 2 同步分组法流程

Fig. 2 Flow chart of synchronous grouping method

$$[\delta_{i, re}] = ([\Delta_{i, z}] - [X_i]) - ([\Delta_{i, T}] - [Y_i]) \quad (1 \leq i \leq N_G) \quad (8)$$

令  $[K] = [\Delta_{i, z}] - [\Delta_{i, T}]$ , 则第  $i$  组的最大筒柱相对标高偏差为

$$\max(|\delta_{i, re}|) = \frac{\max([K]) + \min([K])}{2} + X_i - Y_i \quad (9)$$

式中:  $\max(|\delta_{i, re}|)$  为第  $i$  组最大筒柱相对标高差;  $\max([K])$  为列向量  $[K]$  中的最大值;  $\min([K])$  为列向量  $[K]$  中的最小值。

如果第  $i$  组的最大筒柱相对标高差小于筒柱相对标高差容许值, 则经过标高补偿后, 第  $i$  组所有楼层的筒柱相对标高差均小于容许值。如此, 可将求解标高补偿值的问题描述为一个数学规划模型, 其中目标函数和约束条件如下:

$$\min f(X_i, Y_i) = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} (\max([K]) + \min([K]))/2 + X_i - Y_i \leq \delta_{re} \\ X_{i,1} \leq X_i \leq X_{i,2} \\ Y_{i,1} \leq Y_i \leq Y_{i,2} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $(X_0, Y_0)$  为同步分组方法中,在不考虑筒柱间标高差的情况下,核心筒和框架柱的最佳标高补偿值;  $X_{i,1} \sim X_{i,2}$  为第  $i$  组框架柱标高补偿值范围;  $Y_{i,1} \sim Y_{i,2}$  为第  $i$  组核心筒标高补偿值范围。

此数学规划模型可用图3表示,式(11)中的第一项约束范围可表示为直线  $L$  的左侧区域,第二和第三项约束范围为补偿值可取范围,可用图中阴影部分表示,  $(X_0, Y_0)$  为补偿值可取范围内的某一点。当直线  $L$  在图3阴影部分左边时,不存在合适的标高补偿值使得筒柱之间所有楼层的相对标高差小于容许值,当直线  $L$  与阴影部分相交时或在其右侧时,存在合适的标高补偿值使得筒柱之间所有楼层的相对标高差小于容许值。

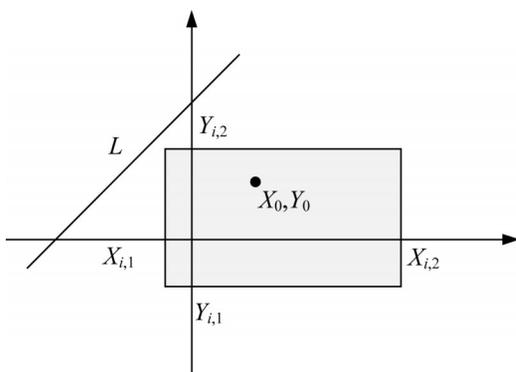


图3 求解示意图

Fig. 3 Solution diagram

文中分组补偿法和同步分组补偿法流程均为先计算框架柱与核心筒的标高差,再进行补偿。此处框架柱和核心筒广义上可认为是两种不同的竖向受力构件,补偿过程不会因为竖向受力构件的形式不同而改变,只会导致补偿数值上的差异,所以该方法同样适用于一般框架剪力墙、筒中筒等结构形式。

### 3 工程案例分析

#### 3.1 工程概况

天津117大厦位于天津市高新区,建筑高度约为597m(至顶部停机坪),共117层,建筑效果如图4a所示。塔楼平面为正方形,如图4b所示,尺寸随高度变化,建筑首层平面尺寸最大,约65m×65m,各层建筑轮廓随楼层增加逐渐变小,顶层平面尺寸约45m×45m。中央混凝土核心筒为矩形,平面尺

寸约37m×37m。塔楼结构受力体系由框架柱与核心筒组成,如图4b所示。框架柱为钢管混凝土柱,截面形状如图5所示,柱截面面积等效半径从3720mm随楼层增加逐渐减少至906mm。柱与框架梁、板通过钢筋混凝土环梁套接,核心筒主要作为高速电梯设备用房和服务用房<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 竖向位移预测分析

采用分步建模法建立天津117大厦的有限元整体模型,考虑框架柱与核心筒间的相互作用,将结构自重作为恒荷载,由于施工活荷载和使用条件下活荷载等非长期荷载对结构时变效应的影响不明显,对结构竖向构件变形影响较低,故在分析中未予考虑。按照现场施工记录,并结合实际监测数据的时间点,模拟实际施工中结构逐层搭建和加载过程。计算开始时间为2012年10月31日,主体结构封顶完成时间取2015年9月8日(共1042d)。在施工过程计算中,考虑混凝土随时间变化的收缩徐变效应,计算条件设定如下:收缩徐变采用CEB-FIP(1990)模型,水泥采用普通硅酸盐水泥;长期荷载作用时混凝土龄期为10d;混凝土与大气接触时的龄期为3d;环境相对湿度80%。混凝土抗压强度随时间变化采用CEB-FIP(1990)的相关公式。由于钢管混凝土内钢管与混凝土为复杂的多向应力状态,为简化计算,假定混凝土与钢管之间黏结可靠,协同工作,且忽略钢管与混凝土的径向作用力,核心混凝土按单轴受力分析。有限元建模时分别建立钢管和混凝土单元,通过单元两端共节点来模拟钢和混凝土的共同工作<sup>[27]</sup>。

图6和图7分别为核心筒西北侧和西北侧框架柱(图4b)在大厦封顶时的竖向位移,位移变化呈鱼腹形状,原因是:虽然底部楼层承受荷载较大,但楼层低,位移积累较小,故竖向变形较小;顶部楼层通过楼层找平会对之前发生的竖向位移进行补偿,故而竖向位移小;中部楼层由于荷载和位移积累量大,所以竖向位移最大。结构封顶时框架柱变形峰值出现在第58层,约为52mm,其中收缩徐变变形约16mm,占总变形量的30.7%。核心筒变形峰值出现在第79层,约为67mm,其中收缩徐变变形约33mm,占总变形量的50.1%。较之框架柱,核心筒的竖向位移数值更大,峰值所在楼层更高。

核心筒的峰值位移大于框架柱的峰值位移,这是因为框架柱截面为钢管混凝土构件,其内部混凝土由于受到钢管的约束,与空气间基本无水分交换,所以收缩应变较小;反之核心筒混凝土的构件厚度

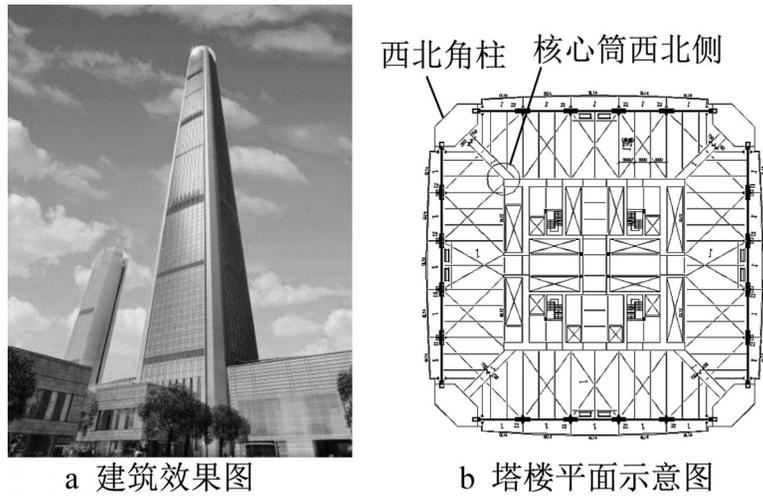


图4 天津117大厦建筑特征

Fig. 4 Tianjin Building 117

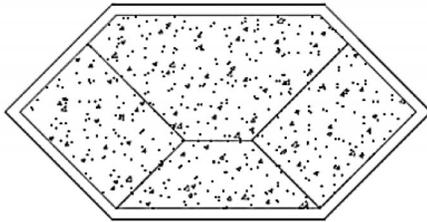


图5 钢管混凝土柱截面

Fig. 5 Cross-section of concrete-filled steel tube column

较小,与空气接触面大,收缩应变较大。由于核心筒单位时间内的收缩徐变位移大,导致楼层竖向位移的累积效应更加显著,从而使得竖向位移峰值出现在较高的楼层。由此可见,收缩徐变会使框架柱与核心筒之间产生较大的竖向位移差,而该差值可能会引起较大的构件附加弯矩和附加剪力,在实际工程设计中应考虑其影响。

### 3.3 不考虑框架柱-核心筒相对标高差的分组补偿法结果

采用分组补偿法对天津117大厦竖向构件标高进行分组补偿,预定时间节点为建筑封顶时刻,楼层标高偏差容许值设置为6 mm,分组结果如表1所示,其中框架柱分组数为8,核心筒分组数为9。图8和图9分别为框架柱和核心筒的补偿结果,其中,“补偿前标高差”为计算位移(见图6和图7中的“合计”变形)。从图中可以看出,对竖向构件的标高进行分组补偿后,在建筑封顶时,竖向构件的实际标高与设计标高之差均保持在6 mm之内。图10为核心筒与框架柱经过标高补偿后的筒柱相对标高差。由

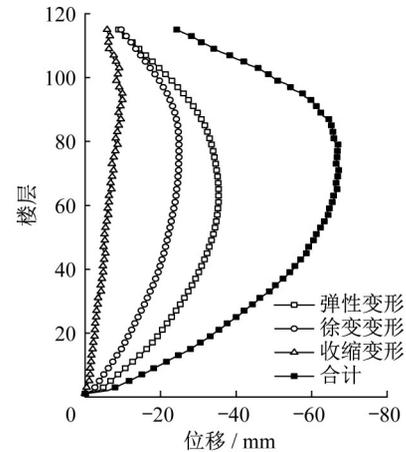


图6 核心筒西北侧竖向位移(封顶时)

Fig. 6 Vertical displacement of northwest core tube

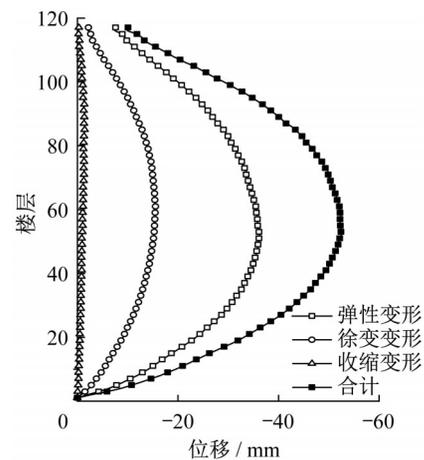


图7 西北侧框架柱竖向位移(封顶时)

Fig. 7 Vertical displacement of northwest frame column

于在进行分组补偿时,未考虑框架柱和核心筒之间的竖向变形差异,部分楼层的框架柱与核心筒之间相对标高差达 10 mm,可能会对结构的安全和使用性能造成不利影响。

表 1 分组补偿法计算结果

Tab. 1 Analytical results of grouping compensation method

框架柱分组结果				核心筒分组结果			
组号	楼层范围	楼层数量	补偿量/mm	组号	楼层范围	楼层数量	补偿量/mm
1	1-5	5	5.4	1	1-5	5	5.8
2	6-13	8	18.2	2	6-13	8	19.0
3	14-23	10	30.6	3	14-23	10	32.0
4	24-40	17	43.1	4	24-35	12	44.6
5	41-88	48	46.6	5	36-55	20	57.4
6	89-100	12	34.6	6	56-96	41	61.4
7	101-110	10	22.2	7	97-104	8	48.9
8	111-117	7	12.7	8	105-111	7	36.4
				9	112-115	4	26.9

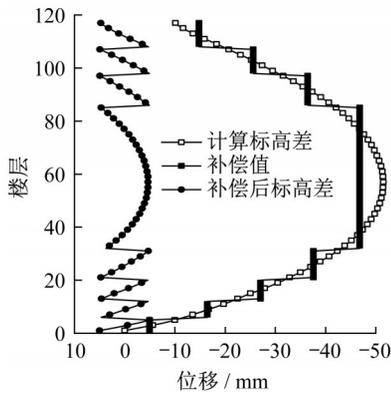


图 8 框架柱分组补偿结果

Fig. 8 Compensation results of frame column using grouping method

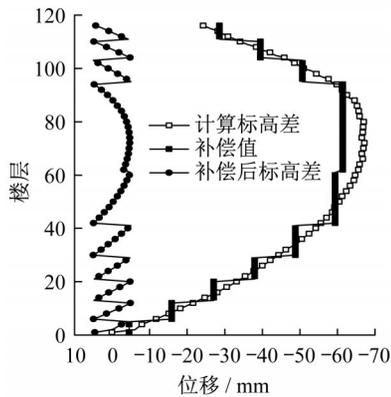


图 9 核心筒分组补偿结果

Fig. 9 Compensation results of core tube using grouping method

3.4 考虑框架柱-核心筒相对标高差的同步分组补

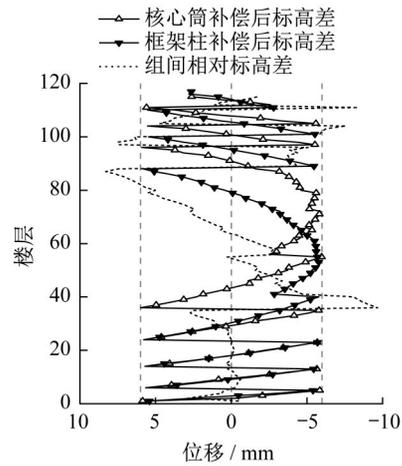


图 10 核心筒与框架柱相对标高差

Fig. 10 Relative elevation deviation between core tube and frame column

补偿结果

采用同步分组补偿法对天津 117 大厦进行分组补偿,设标高差容许值和相对标高差容许值均为 6 mm,补偿结果如表 2 所示,其中框架柱与核心筒的分组数均为 9。图 11 和图 12 分别为核心筒和框架柱

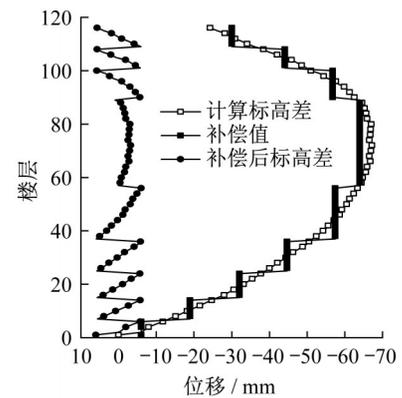


图 11 核心筒补偿结果

Fig. 11 Results of core tube

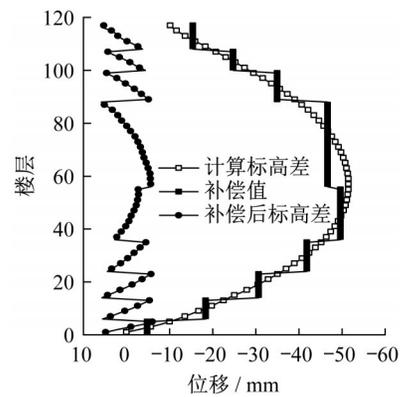


图 12 框架柱补偿结果

Fig. 12 Results of frame column

的标高补偿结果,可知其自身的标高差均在标高差容许值6 mm之内。图13为核心筒与框架柱之间的相对标高差,与图10相比,由于同时考虑了筒柱构件各自的竖向变形和两者之间的竖向变形差异,经过同步分组补偿后,图13所有楼层的相对标高差均在容许值6 mm之内。与分组补偿法相比,采用同步分组补偿法,分组数量无明显增加,该方法具有分组数合理、计算简单、补偿精度高等优点。

表2 同步分组补偿法计算结果

Tab. 2 Analytical results of synchronous grouping compensation method

框架柱分组结果				核心筒分组结果			
组号	楼层范围	楼层数量	补偿量/mm	组号	楼层范围	楼层数量	补偿量/mm
1	1-5	5	4.8	1	1-5	5	6.0
2	6-13	8	18.3	2	6-13	8	18.9
3	14-23	10	30.6	3	14-23	10	32.0
4	24-35	12	41.8	4	24-35	12	44.6
5	36-55	20	49.5	5	36-55	20	57.4
6	56-88	33	46.6	6	56-88	33	63.9
7	89-99	11	34.9	7	89-99	11	56.8
8	100-107	8	24.7	8	100-107	8	44.1
9	108-117	10	15.3	9	108-117	8	30.0

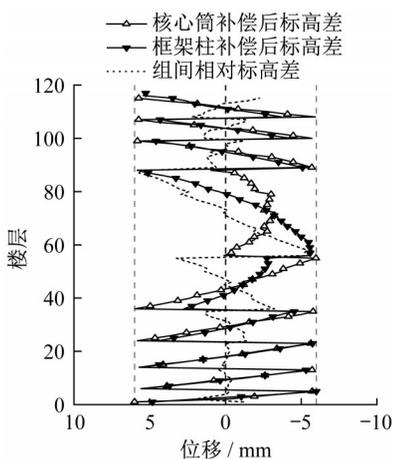


图13 核心筒与框架柱相对标高差

Fig. 13 Relative elevation deviation between core tube and frame column

## 4 结论

(1)由于混凝土的收缩和徐变变形受到环境湿度、构件尺寸和配合比等多种因素的影响,钢管混凝土柱与钢筋混凝土核心筒的收缩和徐变变形存在显著差异。

(2)通过建立天津117大厦的计算模型,并按实际施工方案进行施工过程分析可得:结构封顶时,收

缩徐变变形占框架柱竖向总变形的30.7%,占核心筒竖向总变形的50.1%,且随着时间的推移,收缩徐变对结构竖向变形的影响愈发明显,在实际工程中应予以考虑。

(3)使用标高补偿方法对超高层结构各层竖向构件进行标高补偿,可以有效地缓解和控制超高层结构竖向变形的累积发展,降低由于竖向构件时效效应差异而引起的附加变形和附加内力。

(4)针对标高补偿问题,本文提出了竖向构件同步分组补偿法,该方法可同时考虑不同竖向构件之间的相对标高差,使框架柱与核心筒自身的标高差和两者之间的相对标高差均在容许值之内。该方法具有分组数量合理、补偿精度高和可操作性强的优点,可为超高层结构的设计和施工提供参考。

### 作者贡献声明:

吴杰:论文总体设计、方法指导和论文修改;  
 庞存均:数据处理、算法实现、论文撰写与修改;  
 杨永华:数据分析,论文撰写与修改。

### 参考文献:

- [1] ZHANG P, GUO Q, KE F, *et al.* Axial and bending bearing capacity of double-steel-concrete composite shear walls [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(14): 49.
- [2] 刘鹏, 殷超, 李旭宇, 等. 天津高银117大厦结构体系设计研究[J]. *建筑结构*, 2012, 42(3): 1.  
 LIU Peng, YIN Chao, LI Xuyu, *et al.* Structural system design and study of Tianjin Gaoying117 mega tower [J]. *Building Structure*, 2012, 42(3): 1.
- [3] 张盼盼, 赵昕, 郑毅敏. 超高层混合结构竖向变形分析及补偿[J]. *建筑结构*, 2013, 43(6): 45.  
 ZHANG Panpan, ZHAO Xin, ZHENG Yimin. Vertical members shortening and compensation analysis of super high-rise composite buildings [J]. *Building Structure*, 2013, 43(6): 45.
- [4] BAZANT Z P, WITTMANN F H. *Creep and shrinkage in concrete structures* [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1982.
- [5] LU J, WU J, LUO X, *et al.* Time-dependent analysis of steel-reinforced concrete structures [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2013, 22(15): 1186.
- [6] AN G H, KWON S H, KIM J K. Effect of wide-flange-steel geometry on the long-term shortening of steel-reinforced concrete columns [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2015, 67(23): 1242.
- [7] WU J, ZHANG L, LI Y, *et al.* Prediction of dry shrinkage deformation for partially enclosed steel reinforced concrete columns [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44:

- 102675.
- [8] WANG L, ZHAO X, YAN C. Time-dependent vertical shortening prediction for super-tall buildings by using a modified B3 model to consider moisture distribution [J]. *Engineering Structures*, 2020, 209: 109994.
- [9] ZHAO X, WANG L. Vertical shortening prediction for super-tall buildings considering enclosure effect and coupling effect [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2019, 29(2): e1685.
- [10] SAMARAKKODY D I, THAMBIRATNAM D P, CHAN T H T, *et al.* Differential axial shortening and its effects in high rise buildings with composite concrete filled tube columns [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 143: 659.
- [11] KIM G B, PARK H S. Development of an optimal compensation method for differential column shortening in high-rise buildings [J]. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2003, 12(1): 49.
- [12] CARGNINO A, DEBERNARDI P G, GUIGLIA M, *et al.* Axial shortening compensation strategies in tall buildings. A case study: the new piedmont government office tower [J]. *Structural Engineering International*, 2012, 22(1): 121.
- [13] SECER M, ZAMANI A, ISLER Y. A practical compensation method for differential column shortenings in high-rise reinforced concrete buildings [J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2020, 65(1): 242.
- [14] PHAM H-A, NGUYEN D-X, TRUONG V-H. An efficient differential-evolution-based moving compensation optimization approach for controlling differential column shortening in tall buildings [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 169: 114531.
- [15] 周绪红, 黄湘湘, 王毅红, 等. 钢框架—钢筋混凝土核心筒体系竖向变形差异补偿对结构性能的影响[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(4): 15.  
ZHOU Xuhong, HUANG Xiangxiang, WANG Yihong, *et al.* Influence of the vertical deformation compensation of corewall systems on the characteristics of steel frame-reinforced concrete structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(4): 15.
- [16] PARK H S. Optimal compensation of differential column shortening in high-rise buildings [J]. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2010, 12(1): 49.
- [17] WU L, FARZADNIA N, SHI C, *et al.* Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 149: 62.
- [18] CHINZORIGT G, LIM M K, YU M, *et al.* Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO2 treated recycled fine aggregate [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 136: 106062.
- [19] ZHENG Z, HU D, LIU P, *et al.* Considering the effect of the randomness of concrete strength and relative humidity on concrete creep [J]. *Structural Concrete*, 2021, 22: 916.
- [20] HUANG L, HUA J, KANG M, *et al.* Influence of reinforcement configuration on the shrinkage and cracking potential of high-performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 20.
- [21] FAVRE R, CHARIF H. Basic model and simplified calculations of deformations according to the CEB-FIP model code 1990 [J]. *Structural Journal*, 1994, 91(2): 169.
- [22] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structure (209R-92) [S]. Farmington Hills: America Concrete Institute, 1997.
- [23] GARDNER N J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(2): 159.
- [24] BAZANT Z P, MURPHY W. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3 [J]. *Materials and Structures*, 1995, 28(180): 357.
- [25] YANG L, WANG X M, LI Y Q. On the realization of construction course analysis by ANSYS [J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2006, 4(3): 64.
- [26] 叶智武, 罗永峰, 陈晓明, 等. 施工模拟中分步建模法的改进实现方法及应用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(1): 73.  
YE Zhiwu, LUO Yongfeng, CHEN Xiaoming, *et al.* Improved method of step by step modelling and its application in construction simulation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(1): 73.
- [27] 刘俊, 吴杰, 罗晓群, 等. 高层钢管混凝土结构施工全过程数值模拟[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(5): 50.  
LIU Jun, WU Jie, LUO Xiaoqun, *et al.* Numerical simulation on whole construction process of high-rise CFST structures [J]. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(5): 50.